

# **AValiação DO MODELO SCBR PARA OS PARÂMETROS DE FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: ESTUDO DE CASOS**

**Marcos Felipe Wendt<sup>1,2</sup> e Henry Xavier Corseuil<sup>1,3</sup>**

## **1. Introdução**

Atualmente, 1,1 bilhões de pessoas não têm acesso regular a água potável. A escassez de recursos hídricos associada ao crescimento populacional e à poluição ambiental são motivos de grande preocupação por parte da comunidade internacional. Esta situação é reconhecida pela Organização das Nações Unidas como a “Crise Mundial da Água” [1]. A importância das águas subterrâneas como uma das principais fontes de suprimento de água potável justifica a preocupação com a preservação dos aquíferos e a busca de alternativas para minimização de impactos causados por empreendimentos potencialmente poluidores.

Dentre as atividades industriais potencialmente poluidoras das águas subterrâneas, destaca-se a indústria de petróleo e derivados. Na ocorrência de derramamentos de combustíveis como a gasolina, esta se solubilizará parcialmente em contato com a água subterrânea, liberando compostos como os hidrocarbonetos monoaromáticos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX), que são reconhecidos como compostos perigosos por afetarem o sistema nervoso central e por causarem leucemia em exposições crônicas. A presença do etanol na gasolina comercial brasileira tem grande influência na variação da concentração destes compostos no aquífero [2; 3]. Estudos realizados pela Universidade Federal de Santa Catarina e a Petrobras na Fazenda Experimental Ressacada têm demonstrado que a presença do etanol em derramamentos subsuperficiais pode aumentar a solubilidade dos hidrocarbonetos de petróleo por meio do efeito co-solvência. Além disso, o etanol torna-se o substrato preferencial inibindo a biodegradação dos compostos BTEX [4].

Os resultados das pesquisas realizadas na Fazenda Ressacada motivaram a UFSC e a PETROBRAS a desenvolver em 2003 a primeira versão do modelo matemático SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco – SCBR 1.0. O SCBR é um modelo bidimensional desenvolvido para simular o transporte e o destino de compostos químicos dissolvidos nas águas subterrâneas, que considera a interferência do etanol, e permite a avaliação do risco em áreas contaminadas ou passíveis de contaminação. Atualmente está sendo desenvolvida a versão 2.0 do modelo SCBR – SCBR 2.0.

De acordo com a ASTM – *American Society for Testing and Materials* [5], o desenvolvimento de modelos matemáticos para simulação do fluxo e do transporte em águas subterrâneas envolve basicamente oito etapas: formulação de um modelo conceitual que represente o problema físico em questão; formulação matemática baseada neste modelo conceitual; definição dos métodos que poderão ser utilizados

---

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Laboratório de Remediação de Águas Subterrâneas. [www.remas.ufsc.br](http://www.remas.ufsc.br).

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental. [wendt@ens.ufsc.br](mailto:wendt@ens.ufsc.br).

<sup>3</sup> Orientador do Trabalho de Conclusão de Curso II. [corseuil@ens.ufsc.br](mailto:corseuil@ens.ufsc.br).

na solução da formulação matemática; implementação computacional; verificação do código computacional; calibração do modelo com dados de campo; verificação do modelo com dados de campo; e análise de sensibilidade. A precisão das previsões realizadas com o modelo é fortemente dependente do sucesso na execução de todas as etapas, mas principalmente da calibração e da verificação, que são importantes para avaliar o grau de correspondência dos resultados simulados e os valores medidos em campo. Além disso, estas duas etapas podem indicar a necessidade de alterações na formulação matemática ou no código computacional. No processo de desenvolvimento do SCBR já foram iniciadas as etapas de verificação do código, mas ainda é necessário executar as etapas de calibração, de verificação e de análise de sensibilidade.

## 2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram realizar as etapas de calibração e verificação do modelo matemático SCBR para o modelo de fluxo da água subterrânea e comparar os resultados de simulação do SCBR com os resultados de simulação do modelo Flowpath.

## 3. Revisão bibliográfica

### 3.1. Escoamento em águas subterrâneas

O fluxo de água subterrânea através de meios porosos é governado pelas leis da física e depende de diversas variáveis. Sendo assim, ele pode ser descrito por diferentes equações diferenciais parciais, onde as coordenadas espaciais ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) e o tempo ( $t$ ) são variáveis independentes. Para obter as equações que regem o fluxo de água em aquíferos, empregam-se os princípios de conservação da massa e conservação de energia, e a Lei de Darcy (Equação (1)) [6].

$$q = -K \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

onde:  $q$  = vazão específica;  $K$  = condutividade hidráulica;  $dh$  = diferença de carga de água existente entre dois pontos;  $dl$  = distância entre estes dois pontos.

A lei de Darcy para o fluxo em três dimensões é análoga a definição para o fluxo em uma dimensão:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2)$$

O fluxo unidimensional para a água subterrânea pode ser representado por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

onde:  $S_s$  = armazenamento específico.

Estendendo para o fluxo tridimensional, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

Se no cenário considerado houver uma fonte ou sumidouro ( $R$ ), representando o volume de água introduzido (ou retirado) por unidade de volume do meio e por unidade de tempo, a Equação (4) transforma-se em:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

A Equação (5) aplica-se ao escoamento tridimensional da água subterrânea, tanto no aquífero confinado quanto no aquífero não-confinado.

### 3.2. Calibração e verificação de um modelo

A calibração de um modelo envolve a comparação entre resultados simulados e dados medidos em campo. Neste procedimento, utiliza-se primeiramente para os parâmetros do modelo valores determinados em campo, encontrados na literatura ou obtidos em laboratório. Após rodar o modelo, realiza-se uma comparação estatística entre os resultados obtidos com o modelo e os dados medidos em campo para as variáveis em estudo. Quando os erros se encontrarem dentro da faixa tolerável do método estatístico utilizado para a avaliação, o modelo será considerado calibrado. Se os erros não estiverem dentro da faixa tolerável do método de avaliação, deve-se variar sistematicamente os valores dos parâmetros de entrada no modelo até a obtenção de uma simulação aceitável. O procedimento de calibração exige que as condições de campo do local em estudo sejam corretamente caracterizadas para evitar que o modelo seja calibrado sob circunstâncias que não representem o cenário real [7; 8]. Segundo o MDEQ [7], a calibração de um modelo deve incluir, no mínimo, uma comparação entre as condições simuladas pelo modelo e as condições reais de campo para os seguintes parâmetros: carga hidráulica, direção do fluxo da água subterrânea, gradiente hidráulico e balanço hídrico. Para os modelos que simulam o transporte de contaminantes, deve-se também comparar a concentração de contaminantes, a taxa de migração de contaminantes, a direção de migração e a taxa de degradação.

No procedimento de verificação de um modelo deve-se realizar uma comparação entre os resultados simulados e uma segunda série de dados, independente da série de dados utilizada na calibração. Schnoor [8] recomenda que esses dois jogos de medidas de campo sejam obtidos sob circunstâncias diferentes. Durante a verificação, os parâmetros obtidos na calibração não podem mais ser alterados. A verificação pode ser avaliada sob diversos critérios, dependendo dos dados que estiverem sendo confrontados.

O MDEQ [7] destaca que a calibração e a verificação permitem realizar uma avaliação da performance do modelo que está sendo construído e auxiliam na redução das disparidades entre as simulações do modelo e os dados de campo, melhorando a exatidão do modelo.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Modelo SCBR

O modelo SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco – é resultado da parceria entre a PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), através do Laboratório de Remediação de Águas

Subterrâneas (REMAS), com a colaboração da ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software).

O SCBR é um modelo matemático bidimensional desenvolvido para auxiliar a tomada de decisão no gerenciamento ambiental de áreas impactadas ou em áreas onde são praticadas atividades potencialmente poluidoras. O modelo SCBR permite entre outros, a determinação do fluxo da água subterrânea, a estimativa do alcance e da velocidade de migração de plumas de contaminação, a definição de perímetros de proteção de aquíferos, o cálculo e o mapeamento do risco à saúde humana considerando diversas rotas de exposição e a geração de relatórios e animações. Destaca-se que o modelo SCBR considera a interferência do etanol sobre a biodegradação e a solubilidade dos hidrocarbonetos de petróleo para os casos de contaminações por combustíveis brasileiros, onde se adicionam álcool [9].

A formulação matemática do SCBR foi fundamentada com base no modelo conceitual que representa a contaminação das águas subterrâneas de unidades aquíferas não confinadas. Neste modelo conceitual, os mecanismos primários de contaminação das águas subterrâneas são vazamentos em sistemas de armazenamento e distribuição de produtos químicos, atividades agrícolas, disposição inadequada de resíduos tóxicos, entre outros [10]. Ainda com relação a formulação matemática do modelo matemático SCBR, destaca-se que ela envolve a solução das equações de Darcy no meio poroso, acrescidas das equações de transporte de soluto. Para a solução da equação do escoamento bidimensional o SCBR utiliza o método numérico de volumes finitos.

O modelo de fluxo bidimensional da água subterrânea para aquíferos não confinados implementado no SCBR é conhecida como equação de Boussinesq. Formalmente, a equação de Boussinesq (Equação (6)) é obtida através da integração da equação tridimensional de fluxo sobre a dimensão vertical do aquífero:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + (|q_z| + I) + F = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

onde:  $K_x$  e  $K_y$  são componentes principais do tensor condutividade hidráulica, ao longo dos eixos de coordenadas  $x$  e  $y$ , respectivamente;  $q_z$  é a vazão específica da água subterrânea, na direção de  $z$ ;  $I$  é termo de infiltração de água (recarga) através da superfície superior da zona saturada do meio;  $S_y$  é o coeficiente de armazenamento do meio não-saturado;  $F$  representa o termo fonte ou sumidouro de água. As condições de contorno utilizadas na solução da Equação (6) são do 1º Tipo (Dirichlet), onde a carga hidráulica é especificada no contorno, e o caso especial da condição de 2º Tipo (Neumann), especificando no contorno a condição de não fluxo.

#### 4.2. Modelo Flowpath

O modelo Flowpath é uma ferramenta para análises numéricas bidimensionais que permite, entre outros, o cálculo da velocidade da água subterrânea e a simulação do transporte de contaminantes potenciais [11]. Sua primeira versão foi disponibilizada em 1989. Atualmente, o Flowpath é capaz de simular o fluxo da água subterrânea e o transporte de contaminantes em aquíferos não-confinados, confinados e semi-confinados nas mais diversas condições, como por exemplo, aquíferos com propriedades heterogêneas, múltiplos poços de bombeamento e complexas condições de contorno. Outra característica deste modelo é o cálculo da

carga hidráulica para o estado estacionário. Para a solução da equação do fluxo bidimensional para o estado estacionário (Equação (7)) aplica-se o método das diferenças finitas.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm Q(x, y) = 0 \quad (7)$$

onde:  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  são componentes principais do tensor transmissividade [ $L^2.T^{-1}$ ];  $h$  é a carga hidráulica [L];  $Q(x, y)$  representa o volume de água introduzido (ou retirado) por unidade de área do aquífero – pode representar um poço de injeção/bombeamento, infiltração ou evapotranspiração [ $L.T^{-1}$ ];  $x$ ,  $y$  são as coordenadas cartesianas.

### 4.3. Obtenção dos dados de campo

Para a realização da calibração e da verificação do modelo SCBR foram utilizadas duas fontes de dados, uma proveniente da Fazenda Experimental da Ressacada, que está localizada no sul do município de Florianópolis – SC (Áreas 01 e 02), e outra fornecida pela Petrobras/Transpetro (Terminal de Armazenamento de Combustíveis Parque SUAPE, localizado na cidade de Madre de Deus – BA). Para estas duas fontes foram levantados valores referentes aos parâmetros de fluxo condutividade hidráulica, carga hidráulica e porosidade efetiva. Também foram obtidas junto a estas fontes as coordenadas geográficas de cada área em estudo, bem como as coordenadas dos poços de monitoramento do nível d'água de cada área. A Tabela 4.1 apresenta os dados hidrogeológicos obtidos para as três áreas em estudo.

### 4.4. Calibração do modelo SCBR

O procedimento de calibração adotado está inserido dentro das metodologias apresentadas pela norma ASTM D 6025 – 96: *Standard Guide for Developing and Evaluating Ground-Water Modeling Codes* [5] e pelo Guia de Modelagem Matemática de Águas Subterrâneas do Estado Americano de Michigan [7], que abordam o desenvolvimento de modelos matemáticos. Neste trabalho, a calibração do SCBR foi realizada para os valores de carga hidráulica das Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada e para os valores de carga hidráulica provenientes do Parque SUAPE. Além dos valores de carga hidráulica, foram introduzidos no modelo os parâmetros de fluxo condutividade hidráulica, porosidade efetiva e recarga. A calibração do SCBR foi avaliada pelo modelo de regressão linear, através da obtenção do  $R^2$  da reta determinada pela construção de um gráfico dos pontos medidos em campo versus os resultados da simulação. O modelo foi considerado calibrado com a obtenção de um  $R^2$  maior que 0,80 [8].

Na calibração das Áreas Experimentais 01 e 02 da Fazenda Ressacada foram utilizadas duas séries de dados de carga hidráulica para cada Área Experimental, como mostra a Tabela 4.1. Para cada série de dados de carga hidráulica medida foram realizadas seis calibrações sob diferentes condições de contorno. Assim, determinou-se o melhor conjunto de dados de entrada (melhor calibração) para cada Área Experimental. Na primeira calibração (tipo 1) o domínio de simulação (DS) foi simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros sem a preocupação de ajustá-lo paralelamente a direção do fluxo da água subterrânea (Figura 4.1). Na calibração tipo 1 não foi considerada a influência da recarga ( $recarga=0,0\text{ mm/ano}$ ). Nas calibrações tipo 1a e 1b manteve-se o domínio de simulação conforme ajustado no tipo 1 e

variou-se os valores da recarga para 50 e 100 mm/ano, respectivamente. Na calibração tipo 2 procurou-se ajustar o DS de maneira paralela ao fluxo da água subterrânea gerado pelo modelo SCBR (Figura 4.2). Nesta calibração a influência da recarga não foi considerada, enquanto que nas calibrações tipo 2a e 2b variou-se, respectivamente, a recarga em 50 e 100 mm/ano, mantendo-se o ajuste do DS utilizado na calibração tipo 2. A Tabela 4.2 apresenta um resumo dos tipos de calibração realizados para a Fazenda Ressacada.

Tabela 4.1: Dados hidrogeológicos levantados para as três áreas em estudo.

Área 01			Área 02						Parque SUAPE	
$K=6,6 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ $n_e=0,2$			$K=1,0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ $n_e=0,2$						$K=1,2 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ $n_e=0,2$	
PZ. <sup>1</sup>	C. H. <sup>2</sup> medida (m)		PZ. <sup>1</sup>	C.H. <sup>2</sup> medida (m)		PZ. <sup>1</sup>	C.H. <sup>2</sup> medida (m)		PZ. <sup>1</sup>	C.H. <sup>2</sup> medida (m)
	L.P. 69	L.P. 72		L.P. 20	L.P. 21		L.P. 20	L.P. 21		
PZ-5	4,482	4,582	PE01	3,645	3,655	PM05	3,941	3,936	PM01	1,64
PZ-6	4,457	4,596	PE02	3,716	3,714	PM06	3,822	3,828	PM02	1,62
PZ-7	4,379	4,474	PE03	3,998	3,989	PM18	3,648	3,653	PM03	0,70
PZ-8	4,382	4,508	PE04	4,494	4,485	PZ01	3,792	3,794	PM04	1,76
PZ-9	4,339	4,423	PE06	3,86	3,850	PZ02	3,814	3,814	PM05	1,22
			PE07	3,723	3,700	PZ03	4,003	3,995	PM06	1,39
			PM01	3,985	3,962	PZ05	4,55	4,584	PM07	2,33
			PM02	3,714	3,717	PZ07	3,86	3,861	PM08	2,10
			PM03	3,73	3,713	PZ08	3,712	3,764	PM09	1,33
			PM04	3,626	3,632				PM10	2,56
									PM11	1,43
									PM12	1,50
									PM13	1,50
									PM14	2,53
									PM15	2,25

PZ.<sup>1</sup> – Piezômetro (ou poço de monitoramento); C.H.<sup>2</sup> – Carga Hidráulica.

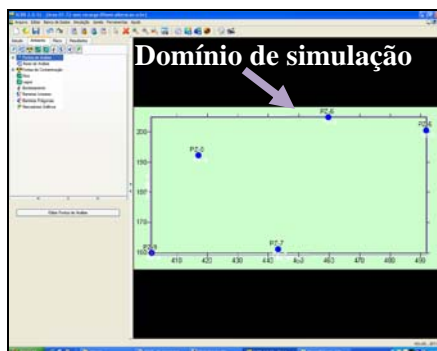


Figura 4.1: Domínio de simulação (DS) simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros.

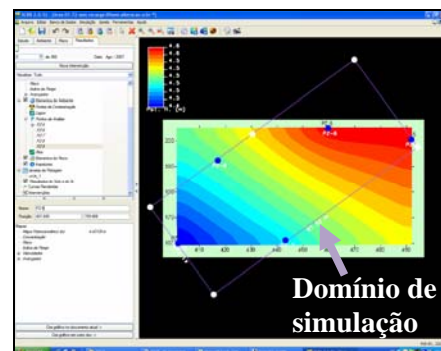


Figura 4.2: Domínio de simulação (DS) ajustado paralelamente à direção do fluxo da água subterrânea.



A calibração do Terminal Parque SUAPE foi realizada somente para a série de dados de carga hidráulica apresentada na Tabela 4.1. Devido aos baixos valores de  $R^2$  encontrados na calibração das Áreas da Fazenda Ressacada quando se inseriu a recarga e à dificuldade em ajustar o domínio de simulação de forma paralela ao fluxo da água subterrânea gerado pelo SCBR, realizou-se apenas um tipo de calibração para o Parque SUAPE. A Tabela 4.3 apresenta as características do tipo de calibração realizado para esta área. Ressalta-se que neste trabalho foi utilizada a versão 2.0.49 do SCBR. Versões anteriores ou posteriores podem apresentar resultados diferentes para as áreas simuladas em função de alguma alteração no código computacional do modelo.

Tabela 4.2: Tipos de calibração realizados para as Áreas 01 e 02 da Ressacada.

Tipo de calibração	D.S. <sup>1</sup> sem considerar a direção do fluxo	D.S. <sup>1</sup> paralelo ao fluxo	Recarga (mm/ano)	Área do D.S. <sup>1</sup> (m <sup>2</sup> )	D.P. <sup>2</sup> (nº de poços/1000m <sup>2</sup> )			
					Área 01	Área 02	Área 01	Área 02
1	Sim	Não	Não	0				
1a	Sim	Não	Sim	50	4.168	39.469	1,20	0,48
1b	Sim	Não	Sim	100				
2	Não	Sim	Não	0				
2a	Não	Sim	Sim	50	4.070	40.106	1,23	0,47
2b	Não	Sim	Sim	100				

D.S.<sup>1</sup> – Domínio da simulação; D.P.<sup>2</sup> – Densidade de piezômetros.

Tabela 4.3: Características da calibração realizada para o Parque SUAPE.

Tipo de calibração	Domínio da simulação sem considerar a direção do fluxo	Domínio da simulação paralelo ao fluxo	Recarga (mm/ano)	Área do DS (m <sup>2</sup> )	D.P. <sup>1</sup> (n.º de poços/1.000m <sup>2</sup> )
1	Sim	Não	Não	0	295.650

D.P.<sup>1</sup> – Densidade de poços de monitoramento.

#### 4.5. Verificação do modelo SCBR

A verificação do modelo SCBR foi realizada somente para as Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada, uma vez que para o Terminal Parque SUAPE só foi adquirido uma série de dados de carga hidráulica. Para a verificação do SCBR foi adotado o seguinte procedimento:

a) Com exceção dos valores de carga hidráulica, os dados de entrada no modelo foram os mesmos utilizados no procedimento de calibração. Foram mantidos os dados de entrada obtidos nos melhores tipos de calibração, isto é, os dados de entrada obtidos nas calibrações que obtiveram os maiores  $R^2$ .

b) Para os valores de carga hidráulica foram utilizadas novas série de dados, uma para cada Área Experimental. Para a Área 01 utilizou-se a coleta 50 (L.P. 50) realizada no dia 17/01/2002. Já para a Área 02 fez-se uso da coleta 22 (L.P. 22) executada no dia 18/04/2007. Rodou-se então o modelo;

d) Os resultados obtidos com o SCBR para carga hidráulica de cada Área foram então comparados com os dados de carga hidráulica medida inseridos no modelo (L.P. 50 e 22). A verificação do modelo também foi avaliada através do modelo de regressão linear, pela obtenção do  $R^2$  da reta determinada pela construção de um gráfico dos pontos medidos em campo versus os resultados da simulação. O modelo foi considerado verificado com a obtenção de um  $R^2$  maior que 0,80.

#### **4.6. Comparação dos resultados de simulação do SCBR com os resultados de simulação do modelo Flowpath**

Nos cenários simulados neste trabalho com o modelo SCBR foi observado que quando se inseriu a recarga, os resultados de simulação sofreram grande variação, resultando em uma acentuada redução nos valores de  $R^2$  à medida que se aumentavam os valores da recarga. Este efeito pode ser facilmente observado através da Tabela 5.1 que apresenta os valores de  $R^2$  obtidos nas calibrações realizadas para as Áreas da Fazenda Ressacada. Então, para verificar se o modelo SCBR está respondendo satisfatoriamente em cenários que possuem recarga, comparou-se os resultados de simulação do SCBR obtidos para a Área 02 da Fazenda Ressacada com os resultados obtidos pelo modelo Flowpath (versão 1.3.2) para esta Área. Foram comparados os mapas potenciométricos gerados por cada modelo e os valores de carga hidráulica simulada obtidos nas calibrações tipo 1 com recarga de 0, 5, 25, 50, 100 e 200 mm/ano com esses modelos para as coletas L.P. 20 e 21. Os valores de carga hidráulica simulada obtidos com os dois modelos foram comparados pelo modelo de regressão linear, através da obtenção do  $R^2$  da reta determinada pela construção de um gráfico dos valores simulados pelo Flowpath versus os resultados de simulação do SCBR. É importante destacar que a configuração do modelo Flowpath para a Área 02 da Ressacada foi realizada de forma idêntica à utilizada no modelo SCBR para esta Área.

### **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os valores de  $R^2$  obtidos nos seis tipos de calibração realizados para as quatro séries de dados utilizadas para a Fazenda Ressacada encontram-se na Tabela 5.1. Pode-se observar que tanto para a Área 01 como para a Área 02 os melhores  $R^2$  foram obtidos para a calibração tipo 1. Para a Área 01, o maior  $R^2$  obtido foi de 0,9974 com a L.P. 69. Na Área 02 o melhor  $R^2$  foi de 0,8156 para a L.P. 20.

Também se pode notar na Tabela 5.1 que um acréscimo nos valores de recarga acarretou na redução dos valores de  $R^2$ . Este efeito negativo da recarga sobre a calibração foi observado nos dois ajustes do domínio de simulação adotados, tipo 1 e tipo 2. Contudo, as calibrações tipo 2 em cenários com recarga, 2a e 2b, atingiram maiores valores de  $R^2$  comparado às calibrações tipo 1a e 1b, respectivamente. Possivelmente as características hidrogeológicas do solo não puderam ser devidamente caracterizadas pelo modelo nos cenários com recarga, e com isso, não foi possível incorporar a variação da recarga na simulação mantendo um  $R^2$  aceitável. Ainda pode-se verificar na Tabela 5.1 que os valores de  $R^2$  obtidos para a Área 02 são sensivelmente menores do que os valores de  $R^2$  da Área 01. A Área Experimental 01 atingiu melhores calibrações do que a Área Experimental 02 provavelmente em função da maior densidade de poços de monitoramento, associada à maior proximidade destes poços ao domínio de simulação. Na Área 01, quatro dos cinco piezômetros foram definidos como condições de contorno para a simulação através



do SCBR, bem diferente da Área 02, onde a grande maioria dos piezômetros não se encontra próximo ao domínio de simulação.

A Tabela 5.2 apresenta os valores de  $R^2$  obtidos no procedimento de comparação dos resultados de simulação do Flowpath e os valores de simulação do SCBR. Como se pode observar, os valores simulados pelos dois modelos apresentam um grau de correspondência elevado, isto é, as simulações resultantes de cenários configurados de maneira idêntica nos modelos SCBR e Flowpath são bastante próximas. Para os cenários com recarga é possível identificar uma leve redução nos valores de  $R^2$  a medida que aumentam os valores de recarga inseridos, entretanto, os valores de  $R^2$  permaneceram elevados.

Tabela 5.1: Valores de  $R^2$  obtidos na calibração das Áreas da Fazenda Ressacada.

Tipo de calibração	Domínio da simulação sem considerar a direção do fluxo	Domínio da simulação paralelo ao fluxo	Recarga		$R^2$ Área 01		$R^2$ Área 02	
			mm/ano		L.P. 69	L.P. 72	L.P. 20	L.P. 21
1	Sim	Não	Não	0	0,9974	0,9941	0,8156	0,8054
1a	Sim	Não	Sim	50	0,7028	0,8473	0,0769	0,0779
1b	Sim	Não	Sim	100	0,3363	0,5827	0,0001	0,0002
2	Não	Sim	Não	0	0,9928	0,9750	0,7875	0,7549
2a	Não	Sim	Sim	50	0,7734	0,9004	0,1118	0,0786
2b	Não	Sim	Sim	100	0,4974	0,7056	0,0118	0,0042

Tabela 5.2: Valores de  $R^2$  obtidos no procedimento de comparação dos resultados de simulação do Flowpath e os valores de simulação do SCBR.

Recarga		$R^2$ Área 02		Recarga		$R^2$ Área 02	
(mm/ano)		L.P. 20	L.P. 21	(mm/ano)		L.P. 20	L.P. 21
0	0,9990	0,9992		50	0,9871	0,9863	
5	0,9986	0,9984		100	0,9786	0,9790	
25	0,9958	0,9903		200	0,9739	0,9750	

Ao confrontar a Figura 5.3 à 5.4 e a Figura 5.5 à 5.6, é possível verificar que os mapas potenciométricos gerados pelo SCBR são bastante similares aos mapas potenciométricos simulados pelo Flowpath tanto nos cenários sem recarga como nos cenários com recarga.

A Figura 5.7 apresenta a avaliação da calibração do Terminal Parque SUAPE através do modelo de regressão linear. Como se obteve um  $R^2$  de 0,80, o SCBR foi considerado calibrado para o Parque SUAPE. É importante destacar que o Parque SUAPE encontra-se localizado numa região que sofre influência da maré, e esta certamente interfere na calibração do SCBR para os valores de carga hidráulica desse Terminal.

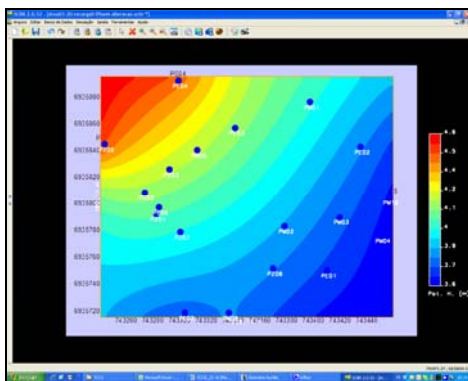


Figura 5.3: Campo potenciométrico gerado pelo SCBR para a calibração para Área 02 (série de dados L.P. 20; *recarga*=0mm/ano).

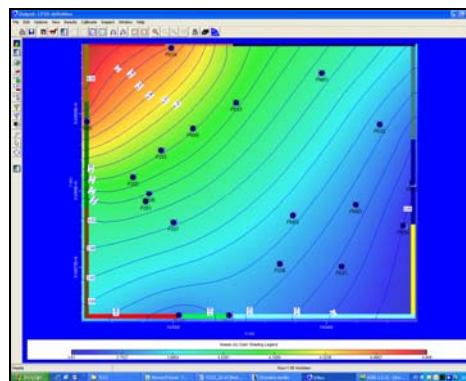


Figura 5.4: Campo potenciométrico gerado pelo Flowpath para a calibração tipo 1 da Área 02 (série de dados L.P. 20; *recarga*=0mm/ano).

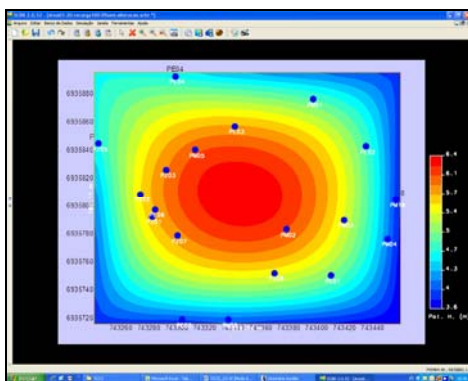


Figura 5.5: Campo potenciométrico gerado pelo SCBR para a calibração tipo 1b da Área 02 (série de dados L.P. 20; *recarga*=100mm/ano).

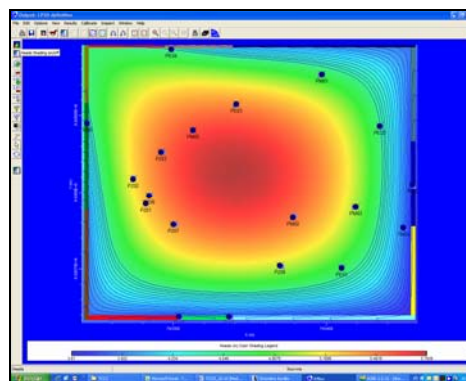


Figura 5.6: Campo potenciométrico gerado pelo Flowpath para a calibração tipo 1b da Área 02 (série de dados L.P. 20; *recarga*=100mm/ano).

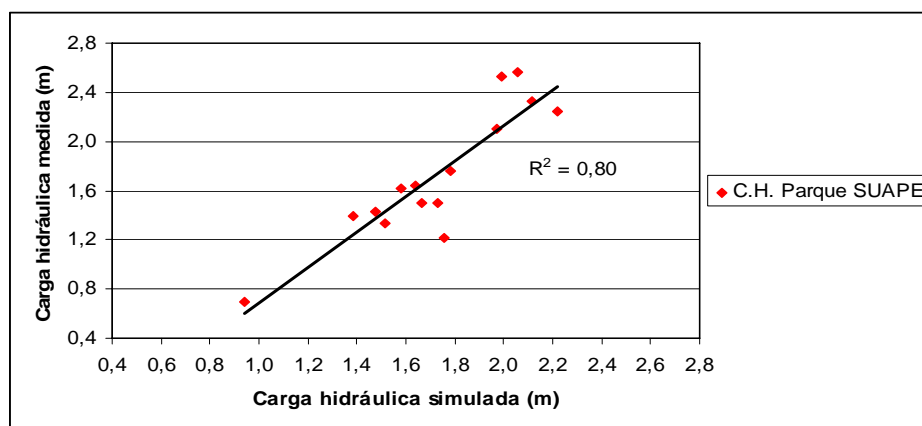


Figura 5.7: Avaliação da calibração do SCBR para os dados provenientes do Terminal Transpetro Parque SUAPE através do modelo de regressão linear.

As avaliações dos procedimentos de verificação do SCBR para as Áreas 01 e 02 da Ressacada encontram-se nas Figura 5.8 e 5.9. Como os valores de  $R^2$  obtidos foram de 0,95 e 0,80 para as Áreas 01 e 02, respectivamente, o modelo SCBR foi considerado verificado para as Áreas da Fazenda Experimental Ressacada.

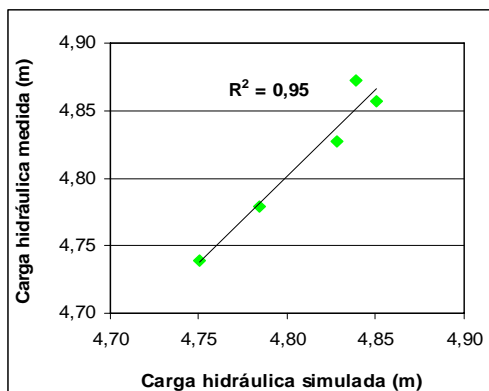
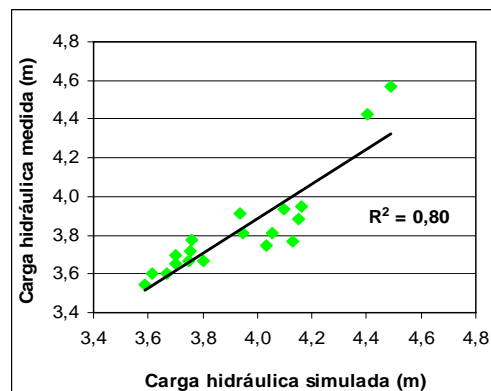


Figura 5.8: Verificação do modelo SCBR para a L.P. 50 da Área 01.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UNITED NATIONS. World Water Assessment Programme. **Water for People, Water for Life**. The United Nations World Water Development Report, March, 2003. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556e.pdf>>. Acesso em: 29 março 2007.
- [2] CORSEUIL, H.X. & FERNANDES, M. Efeito do etanol no aumento da solubilidade de compostos aromáticos presentes na gasolina Brasileira. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 4, n. 1 e 2, p. 71-75, 1999.
- [3] CORSEUIL, H.X.; KAIPPER, B.I.A. & FERNANDES, M. Cosolvency effect in subsurface systems contaminated with petroleum hydrocarbons and ethanol. **Water Research**, v. 38, p.1449-1456, 2004.
- [4] CORSEUIL, H.X.; HUNT, G.S.; SANTOS, R.C.F. dos & ALVAREZ, J.J. The influence of the gasoline oxygenate ethanol on aerobic and anaerobic BTX biodegradation. **Water Research**, v.32, n. 7, p. 2065-2072, 1998.
- [5] ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. D 6025 – 96: **Standard Guide for Developing and Evaluating Ground-Water Modeling Codes**. Philadelphia, 2002. 16 p.
- [6] FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 3. ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1994. 691 p.
- [7] MANDLE, R. J. **Groundwater Modeling Guidance**. Ground Water Modeling Program. Michigan Department of Environmental Quality. 2002. 55 p.
- [8] SCHNOOR, J.L. **Environmental modeling: fate and transport of pollutants in water, air and soil**. 1 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996. 682 p.
- [9] PETROBRAS – Petróleo brasileiro S.A.; UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina; ESSS – Engineering Simulation and Scientific Software. **Solução Corretiva Baseada no Risco – versão 2.0: Guia do Usuário**. Laboratório de Remediação de Águas Subterrâneas. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2006. 100 p.
- [10] CORSEUIL; H.X.; SCHNEIDER, M.R.; ROSÁRIO, M.; MALISKA JR., C. Solução Corretiva baseada no Risco (SCBR): Modelo Matemático de Tomada de Decisão para o Gerenciamento Ambiental de Águas Subterrâneas Contaminadas. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2006, Curitiba, **Anais...** São Paulo: ABAS, 2006.
- [11] FRANZ, T.; GUIGUER, N. **FLOWPATH: Two-Dimensional Horizontal Aquifer Simulation Model. User's manual: version 4**. Groundwater flow and pathlines simulation model. Waterloo Hydrogeologic Software: Waterloo, 1990.